

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

(рівень вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Розробка та дослідження автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота з використанням синхронних серводвигунів»

КНУ.МР.141.24.776-12

Виконав студент II курсу, групи ЕПА-23м /Владислав РУХАЙЛО/
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

к.т.н., доцент

_____/Юрій ОСАДЧУК/

Нормоконтролер:

к.т.н., доцент

_____/Юрій ОСАДЧУК/

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор

_____/Олег СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

_____/Юрій ОСАДЧУК/

Кривий Ріг
2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ
ОСВІТИ**

РУХАЙЛО Владислав Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Розробка та дослідження автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота з використанням синхронних серводвигунів

1. Термін подання студентом роботи: 09 грудня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою даного дипломного проекту є розробка та дослідження автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота з використанням синхронних серводвигунів.
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Автоматизована система керування електромеханічною системою промислового робота; II. Обґрунтування і розробка системи керування та автоматизації електроприводу; III. Дослідження автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота з використанням синхронних серводвигунів.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Загальний вид промислового робота; II. Розробка автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота з використанням синхронних серводвигунів; III. Розробка системи керування електромеханічною системою

промислового робота; IV. Дослідження автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота; VII. Розробка автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Юрій ОСАДЧУК		
II	Юрій ОСАДЧУК		
III	Юрій ОСАДЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Система керування електромеханічною системою промислового робота	05.09.24
2	Вибір системи керування	11.09.24
3	Розрахунок ланок керування	15.09.24
4	Розрахунок елементів керування	21.09.24
5	Розрахунок електромеханічної системи промислового робота	23.10.24
6	Структура системи керування	27.10.24
7	Розрахунок системи керування	30.10.24
8	Вибір елементів автоматизованої системи керування	02.11.24
9	Дослідження системи керування	05.12.24
10	Аналіз ефективності системи керування	08.12.24

Дата видання завдання 02.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

Владислав РУХАЙЛО

(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____

(підпис)

Юрій ОСАДЧУК

(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра на тему «Розробка та дослідження автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота з використанням синхронних серводвигунів»

КНУ.МР.141.24.776-12

Об'єкт дослідження – система керування електромеханічною системою промислового робота

У роботі було розглянуто автоматизовану систему керування електромеханічною системою промислового робота з використанням синхронного електроприводу.

Проаналізовано можливості автоматизації системи керування електромеханічною системою промислового робота з використанням модернізації алгоритмів роботи. Було прийнято автоматизовану систему керування з використанням синхронних серводвигунів.

Також було проведено дослідження автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота на базі синхронного електроприводу й отримано графіки перехідних процесів, що підтверджують ефективність запропонованої системи керування.

**ПРОМИСЛОВИЙ РОБОТ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА,
СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, СИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД**

Зміст

Вступ.....	7
РОЗДІЛ 1. Автоматизована система керування електромеханічною системою промислового робота.....	12
1.1 Система керування електромеханічною системою промислового робота.....	12
1.2 Вибір системи керування електромеханічною системою промислового робота.....	20
1.3 Розрахунок ланок керування електромеханічною системою промислового робота.....	22
1.4 Розрахунок елементів керування електромеханічною системою промислового робота.....	33
1.5 Розрахунок електромеханічної системи промислового робота.....	34
РОЗДІЛ 2. Розробка автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота з використанням синхронних серводвигунів.....	39
2.1. Структура системи керування електромеханічною системою промислового робота.....	39
2.2. Розрахунок системи керування електромеханічною системою промислового робота.....	41
2.3. Автоматизована система керування електромеханічною системою промислового робота	49
2.4. Вибір елементів автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота	52
РОЗДІЛ 3. Дослідження автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота з використанням синхронних серводвигунів.....	56
3.1. Дослідження системи керування електромеханічною системою промислового робота	56

3.2. Аналіз ефективності системи керування електромеханічною системою промислового робота	60
Висновки	61

Вступ

У новітній історії розвитку промисловості значуще місце займають процеси удосконалення технологічних ліній виробничих установок.

Виробничі процеси, задіяні у підготовці та виробленні кінцевої продукції, виконуються на промисловому обладнанні, що створює структуру технологічних ліній.

Подібні процеси у промислових виробництвах, з огляду їх удосконалення, потребують часткової або повної автоматизації.

Технологічні лінії сучасних виробничих установок автоматизуються завдяки впровадженню різноманітних роботизованих структур.

Доволі часто у виробничому процесі застосовуються локальні роботизовані платформи, що частково замінюють присутність оператора, що керує процесом виготовлення або підготовки продукції.

Більш згуртований підхід щодо процесу удосконалення технологічного процесу є повна заміна технологічної лінії роботизованими платформами, що забезпечують повну автоматизацію процесу виготовлення та розподілу готової продукції.

Роботизованими платформами що набули широкого розповсюдження у промисловому виробництві є маніпулятори та автоматичні системи що відтворюють рухи людини.

Вони забезпечують автоматизацію технологічного процесу сучасних виробничих підприємств.

Тому вони є важливими для розвитку та налагодження динамічної роботи підприємства щодо виготовлення та підготовки готової продукції у його структурі.

Такі системи ефективно, а саме головне із заданої точністю мають можливість переміщувати предмети у просторі.

Маніпуляційні системи, що відтворюють рухи людини, застосовують для переміщення як невеликих предметів, так й значних за вагою та за об'ємом.

Точність та своєчасність виконання подібних операцій забезпечує система керування маніпулятором.

Подібні системи набули важливого значення у різних галузях промисловості.

Тому налічується велика кількість типів та різноманіття різновидів подібних структур виходячи від потреб промислового обладнання або виробничого процесу чи технології виробництва.

За принципом виконавчих дій подібних систем можна розділити системи з гідравлічним, пневматичним та електричним приводом, що приводить до руху складові елементи конструкції маніпулятора.

У будь якому випадку координацію рухомих складових із забезпеченням відповідної траєкторії руху об'єкту що переміщується за допомогою маніпулятора виконує система керування.

Промислові роботизовані системи оснащені програмним забезпеченням, що здійснює керування роботизованою системою як об'єкту у структурі технологічного комплексу.

Тому розглядають керування об'єктом технологічного комплексу на локальному рівні із формуванням завдань, що пов'язані із узгодженням дій на рівні загального технологічного процесу, тобто на вищому рівні формування команд.

Щодо дослідження характеристик механічної складової у розбудові промислового маніпулятора то слід відзначити, що системи засновані на електричному приводі для відтворення руху елементів маніпулятора є більш

маневрені та менш інерційні, а також забезпечують високі показники динаміки електромеханічної системи промислового маніпулятора завдяки зменшенню ваги ланок механізму, а також часу перехідного процесу при надходженні сигналу керування на виконавчій об'єкт.

Складовими маніпуляторів, що приводяться до руху електричними приводами є ланки, що забезпечують наявність ступенів свободи руху подібних систем із використанням сервоприводів.

Система керування кожним з таких просторових сегментів відтворює необхідний рух кожної з ланок об'єкту, що забезпечує виконання заданого переміщення за допомогою електричних двигунів.

Для точності відтворення руху об'єкту необхідне повне узгодження траєкторій руху кожної з ланок.

Цей процес погоджується на рівні керування маніпулятором з визначенням траєкторії та послідовності руху для кожної з його ланок, що досягається наявністю певної ступені свободи руху розробленої системи.

Для реалізації руху складових систем маніпулятора, як складного механізму можна запропонувати системи що містять електричні двигуни, які можуть знаходитись безпосередньо у ланках маніпулятора та бути складовою частиною блоків реалізації та відтворення траєкторії руху конкретної ланки.

Виходячи з технічних характеристик маніпулятора для забезпечення його роботи розраховується потужність електричних двигунів, що будуть забезпечувати можливість руху ланок маніпулятора.

Ці розрахунки проводяться з метою визначення електричної потужності електричних двигунів що складатимуть плечі робочих ланок маніпулятора у відповідності до його кінематичної схеми та робочих характеристик.

Вимоги щодо вибору типу електричного двигуна пов'язані з умовою необхідності створення суттєвого моменту обертання кожної з ланок у поєднанні з невеликими розмірами самої ланки.

Також важливе значення має точність позиціонування що забезпечується точністю відтворення руху.

Процес відтворення точності руху досягається завдяки стабілізації частоти обертання електричного двигуна.

Також електричний привод ланок маніпулятора має володіти гарними динамічними характеристиками.

У сучасних роботизованих системах використовують електропривод як змінного так і постійного струму.

Електричний привод на базі електричних двигунів змінного струму є більш простим та економічним.

Розглядають системи, що складаються з асинхронного чи синхронного електричного двигуна.

При цьому керування подібними системами виконується за допомогою керованого перетворювача.

Перетворювачі електричної енергії для живлення обмотки статора електричних двигунів змінного струму виконуються на основі частотної або широтної модуляції керуючого сигналу.

Завдяки ним забезпечується ефективність роботи електричного приводу маніпулятора.

При цьому система керування електроприводом має забезпечити гідні показники динаміки роботи складових ланок маніпулятора.

Доволі високі показники щодо точності позиціонування можуть забезпечити слідкуючи системи керування електроприводом.

Важливим для ефективного функціонування подібних структур є наявність перехресного зв'язку по кожній з координат траєкторії руху об'єкту керування.

Синтез подібної системи керування при правильному налаштуванні відповідних регуляторів у кожному з контурів дозволяє забезпечити гідні показники динаміки кожного з електричних приводів як складових структури маніпулятора, та і усього маніпулятора в цілому, як об'єкту керування цілого комплексу.

При цьому запрограмована траєкторія руху відслідковується за допомогою відповідних датчиків.

Моделювання динамічних режимів розробленого електромеханічного комплексу маніпулятора виконується завдяки можливостям обчислювальної техніки при використанні розрахункових програм.

Показників динаміки електроприводу маніпулятора дозволяють здійснювати координацію траєкторії кожної з ланок системи у відповідності із заданою траєкторією руху виконавчого об'єкту.

РОЗДІЛ 1

Автоматизована система керування електромеханічною системою промислового робота

1.1 Система керування електромеханічною системою промислового робота

Промислові маніпулятори можна віднести до спеціалізованих механізмів циклічної дії.

Вони виконують відповідальне та складне виробниче завдання в умовах технологічної лінії або ланки.

Зазвичай вони представлені складною технологічною установкою зі специфічною кінематичною схемою.

Промислові маніпулятори складаються з окремих технологічних блоків які поєднані у загальну структуру механізму.

Кожен з окремих елементів механічної структури маніпулятора виконує одне нескладне завдання у вигляді відтворення можливості руху у тому чи іншому напрямку, що забезпечується окремим елементом.

У якості рушійного елемента кожної з окремих механічних частин маніпулятора може виступати електричний двигун.

Кожен з електричних двигунів приводить до руху свою механічну частину, таким чином забезпечується траєкторія руху усього механізму.

Кожна з таких частин надає ступінь свободи, або рухомості маніпулятору у просторі.

Найпоширеніші промислові маніпулятори мають від трьох до шести ступенів свободи вільності руху.

У якості електричних двигунів що забезпечують ступінь рухомості промислового маніпулятора можна віднести електричні двигуни постійного або змінного струму.

Двигуни постійного струму відрізняються простотою виконання управління ними.

До недоліків слід віднести необхідність постійного нагляду та складність щодо питання експлуатації.

Тому варіант використання у якості елементів, що забезпечують рухомість ланок, що складають промислові маніпулятори, електричних двигунів змінного струму є більш перспективний, унаслідок поєднання простоти їх виконання та керування ними.



Рис.1.1. Структура промислового робота



Рис. 1.2 – Елементи промислового робота



Рис.1.3. Загальний вигляд промислового робота

№	Найменування параметра	Значення
1	Корисне навантаження, кг	6
2	Кількість осей	6
3	Стабільність повторюваності, мм	$\pm 0,03$
4	Максимальний виліт, мм	706,7
5	Зміна кута осі 1 (A1), °	± 170
6	Зміна кута осі 2 (A2), °	+45/-190
7	Зміна кута осі 3 (A3), °	+156/-120
8	Зміна кута осі 4 (A4), °	± 185
9	Зміна кута осі 5 (A5), °	± 120
10	Зміна кута осі 6 (A6), °	± 350
11	Монтаж	Підлоговий
12	Маса, кг	50

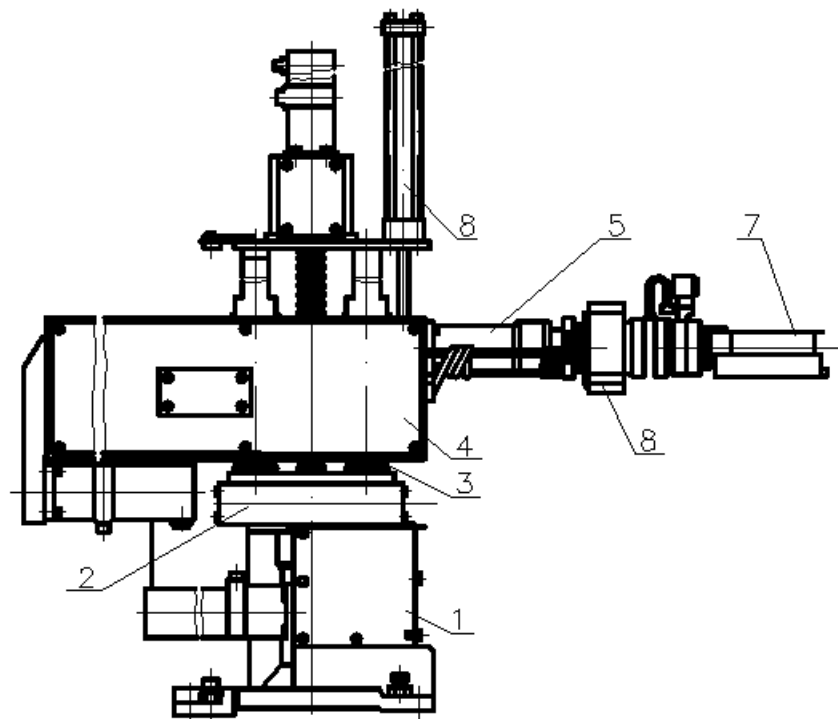


Рис.1.4. Структура промислового робота

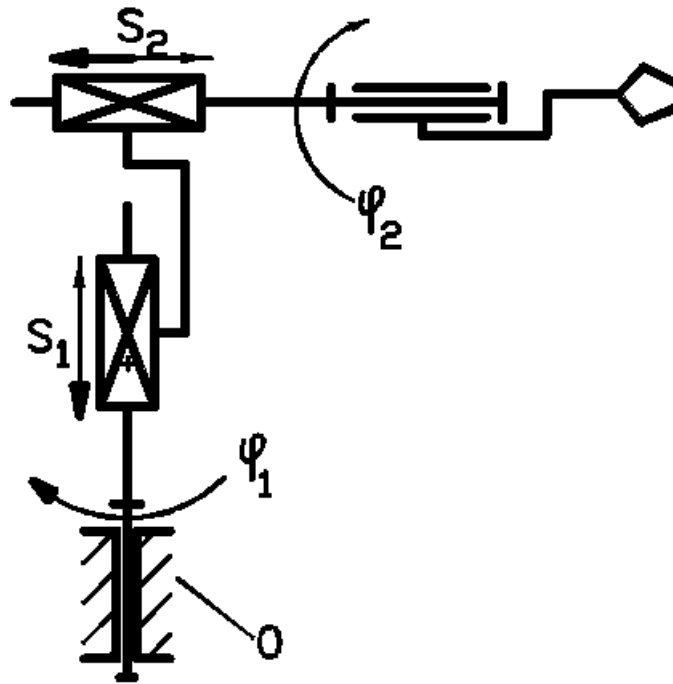


Рис. 1.5. Кінематична схема промислового робота

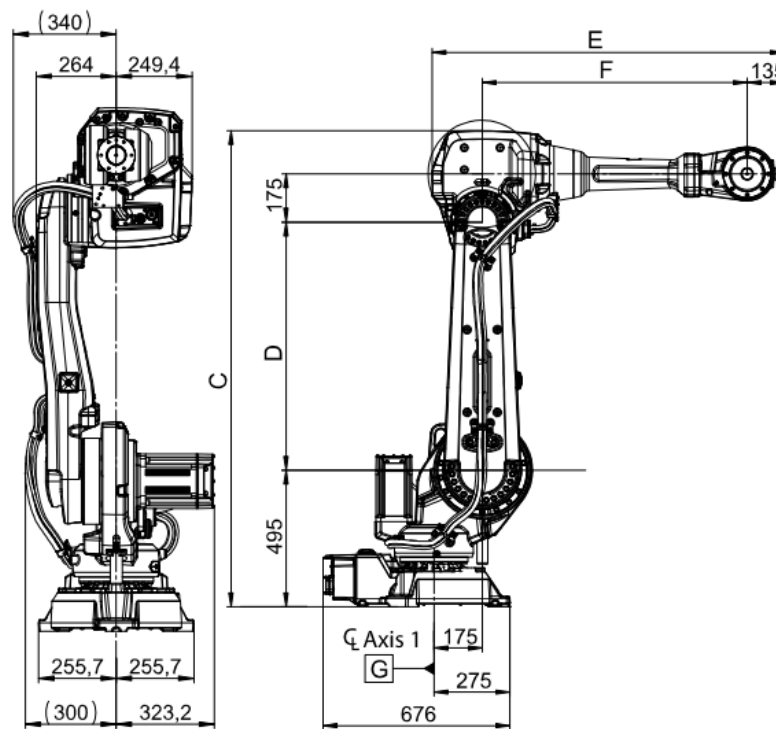


Рис. 1.6. Габаритні розміри промислового робота

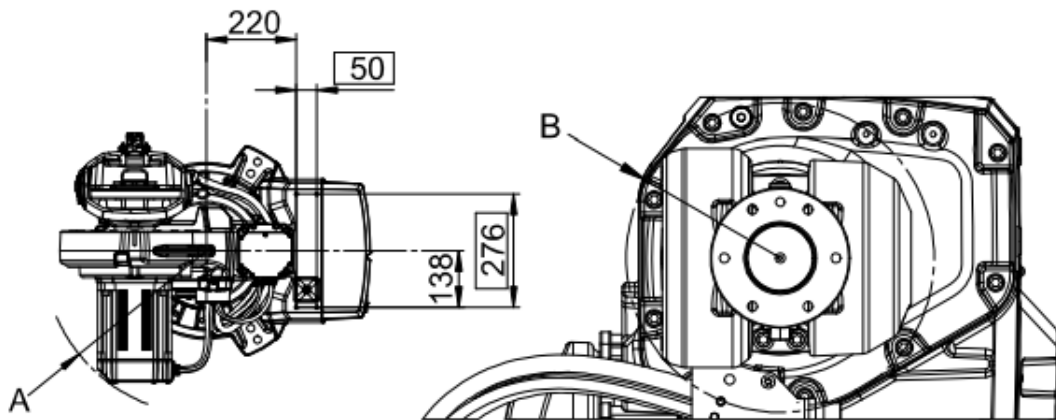


Рис. 1.7. Габаритні розміри промислового робота

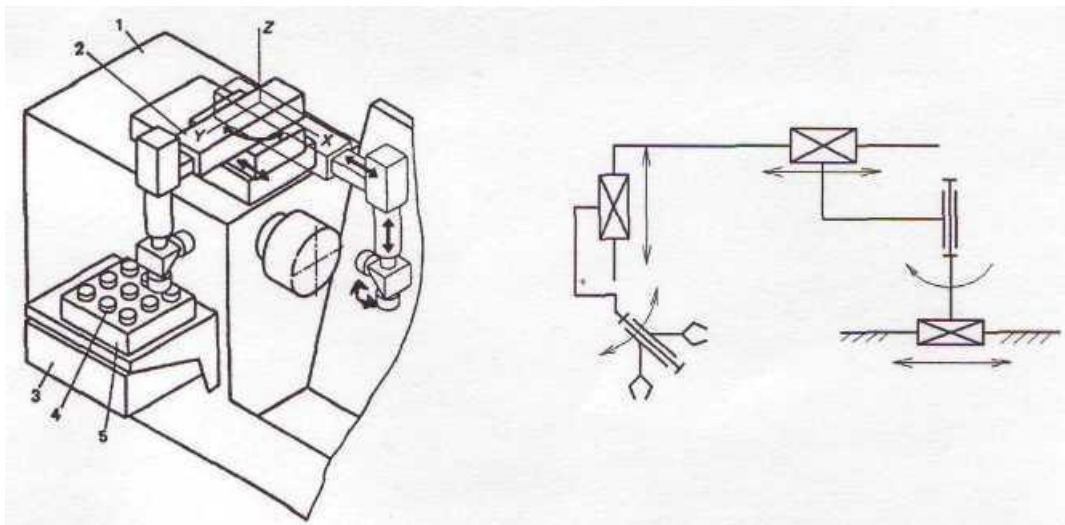


Рис.1.8. Робоча зона промислового робота

1.2. Вибір системи керування електромеханічною системою промислового робота

Для забезпечення можливості виконання промисловим маніпулятором технологічних операцій слід дотримуватись встановленої траєкторії руху його складових елементів.

При цьому траєкторія руху кожної з окремих ланок має узгоджуватись з загальною траєкторією.

Ця вимога висуває умови щодо одночасно простоти та надійності відтворення керування такими елементами.

При використанні у якості елементів електропривод складових руху маніпулятору двигунів змінного струму можна розглядати такі їх представники як асинхронні чи синхронні.

Синхронні двигуни відрізняються доволі складним та відповідальним конструктивним виконанням.

Асинхронні двигуни представлені у промисловості доволі широким виробничим рядом.

Але виходячи з позиції точності регулювання параметрів автоматизовані системи електроприводу з асинхронними двигунами значно поступаються електроприводу з синхронними двигунами.

Слід зазначити що використання у конструкції синхронних машин елементів з постійним магнітним полем дещо спрощує складність їх виконання.

Тому можна зазначити, що від вибору системи керування електроприводом буде залежати точність та ефективність виконання промисловим маніпулятором його завдань.

Серед конкурентних систем можна навести системи частотного керування асинхронними двигунами за допомогою частотного перетворювача а також системи коркових або частотно-регульованих електроприводів з синхронними електричними двигунами.

1.3. Розрахунок ланок керування електромеханічною системою промислового робота

Відповідно до кінематичних схем кожної з ланки промислового маніпулятора розраховується система електропривода яка приводить до руху кожну з таких ланок.

На основі цих розрахунків можна буде виконати вибір складових електроприводу.

$$x_c = \frac{\sum V_i \cdot x_i}{\sum V_i};$$

$$y_c = \frac{\sum V_i \cdot y_i}{\sum V_i};$$

$$z_c = \frac{\sum V_i \cdot z_i}{\sum V_i};$$

Тоді:

$$V_1 = a \cdot b \cdot h = 107.5 \cdot 35 \cdot 22 = 82775 \text{ (см}^3\text{)};$$

Для першого:

$$V_2 = a^3 = 35^3 = 42875 \text{ (см}^3\text{)};$$

Для другого:

$$V_3 = a \cdot b \cdot h = 79 \cdot 17.5 \cdot 20 = 27650 \text{ (см}^3\text{)};$$

Для другого:

$$V_4 = \pi \cdot R^2 \cdot h = 3.14 \cdot 10^2 \cdot 25 = 7854 \text{ (см}^3\text{)};$$

Отже:

$$V_5 = a \cdot b \cdot h = 50 \cdot 12.5 \cdot 12.5 = 9113 \text{ (см}^3\text{)};$$

Тоді:

$$\begin{aligned} x_c &= \frac{(V_1 \cdot C_{1x}) + (V_2 \cdot C_{2x}) + (V_3 \cdot C_{3x}) + (V_4 \cdot C_{4x}) + (V_5 \cdot C_{5x})}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5} = \\ &= \frac{(82775 \cdot 53.75) + (42875 \cdot 125) + (27650 \cdot 182) + (7854 \cdot 231.5) + (9113 \cdot 266.5)}{82775 + 42875 + 27650 + 7854 + 9113} = \\ &= 112.104 \text{ (см)} = 1.12 \text{ (м)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_c &= \frac{(V_1 \cdot C_{1y}) + (V_2 \cdot C_{2y}) + (V_3 \cdot C_{3y}) + (V_4 \cdot C_{4y}) + (V_5 \cdot C_{5y})}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5} = \\ &= \frac{(82775 \cdot 17.5) + (42875 \cdot 17.5) + (27650 \cdot 8.75) + (7854 \cdot 12.5) + (9113 \cdot 6.75)}{82775 + 42875 + 27650 + 7854 + 9113} = \\ &= 15.273 \text{ (см)} = 0.15 \text{ (м)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_x &= \frac{(V_1 \cdot C_{1z}) + (V_2 \cdot C_{2z}) + (V_3 \cdot C_{3z}) + (V_4 \cdot C_{4z}) + (V_5 \cdot C_{5z})}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5} = \\ &= \frac{(82775 \cdot 11) + (42875 \cdot 17.5) + (27650 \cdot 10) + (7854 \cdot 12.5) + (9113 \cdot 6.75)}{82775 + 42875 + 27650 + 7854 + 9113} = \\ &= 12.316 \text{ (см)} = 0.12 \text{ (м)}. \end{aligned}$$

Інерція:

$$J_c = \frac{1}{3} \cdot m \cdot l^2;$$

Отже:

$$J_n = \frac{1}{3} \cdot 350 \cdot 1.121^2 = 146.618 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)};$$

Для моменту:

$$M_{\text{дин}} = J_{\text{п}} \cdot \varepsilon_{\text{пюм}} = 146.618 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) \cdot 10 = 1466.2 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Для потужності:

$$P = M_{\text{дин}} \cdot \frac{\omega}{\eta};$$

Отже:

$$P = 1466.2 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \cdot \frac{3.491}{0.85} = 6.022 \text{ (кВт)};$$

Розрахунки для редуктора:

$$i_{\text{опт}} = \frac{n_{\text{дтюм}}}{n_{\text{м}}};$$

Отже:

$$n_{\text{м}} = \frac{\omega}{0.1047} = \frac{3.491}{0.1047} = 33.33 \left(\frac{\text{Об}}{\text{хв}} \right);$$

Або:

$$i_{\text{олт}} = \frac{1500 \left(\frac{\text{Об}}{\text{ХВ}}\right)}{33.33 \left(\frac{\text{Об}}{\text{ХВ}}\right)} = 45.005;$$

Інерція:

$$\begin{aligned} J_{\text{сум}} &= J_{\text{н}} + J_{\text{д}} + J_{\text{р}} = \\ &= 146.618 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) + 9.5 \cdot 10^{-3} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) + 1.83 \cdot 10^{-4} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) \\ &= 146.628 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2); \end{aligned}$$

Момент:

$$M_{\text{дин}} = J_{\text{сум}} \cdot \varepsilon_{\text{ном}} = 146.628 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) \cdot 10 = 1466.279 \text{ (Н} \cdot \text{м)};$$

$$P = 1466.279 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \cdot \frac{3.491}{0.85} = 6.022 \text{ (кВт)}.$$

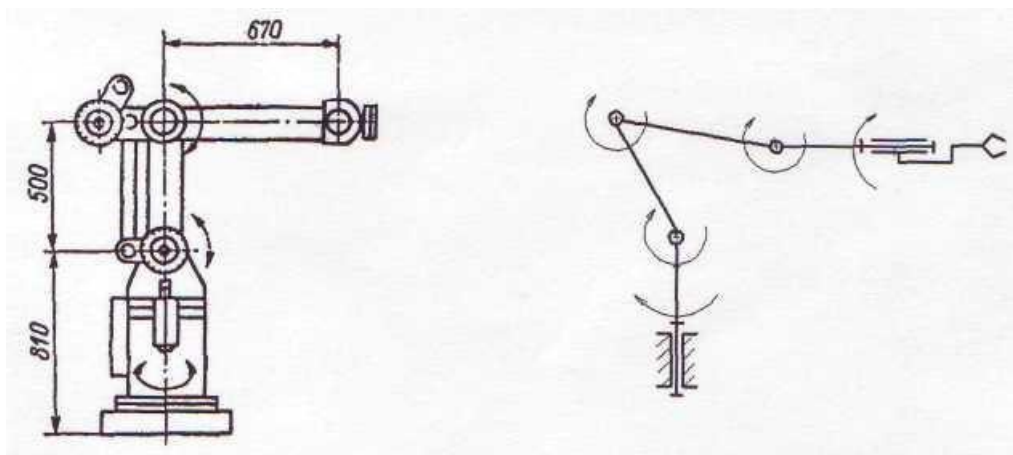


Рис.1.9. Кінематична схема промислового робота

Таблиця 1.1. Параметри промислового робота

Характеристика	«Циклон-3Б»	«Циклон-5.01»	«Ритм-05»
Номінальна вантажопідйомність однієї руки, кг	3	5	0,5
Тип приводу	Пневматичний		
Система програмного керування	Циклова		
Тип системи керування	ПУР-Ц	УЦМ-20	УПЦМ
Кількість координат, що програмуються шт.	4		5
Найбільший кут повороту руки в горизонтальній площині, град	180		
Найбільший вертикальний хід руки, мм	100		50
Найбільший хід висування руки, мм	600		400

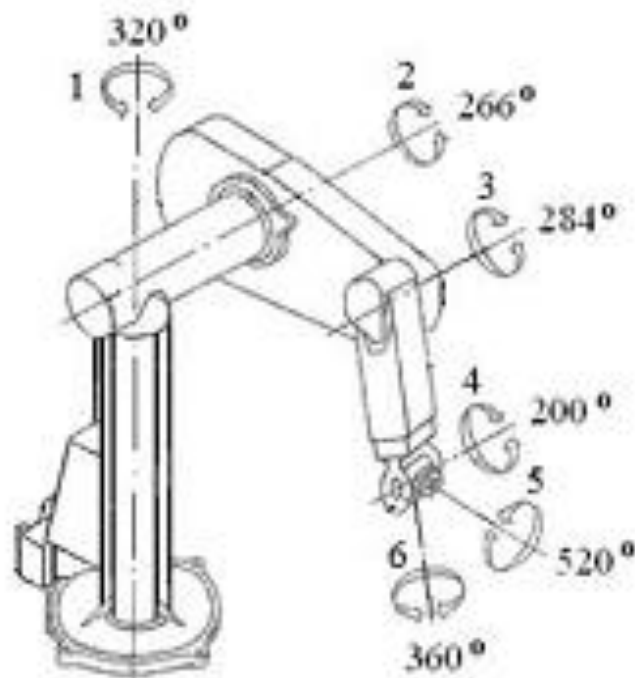


Рис.1.10. Кінематична схема промислового робота

Швидкість:

$$\omega_2 = \frac{V_{p.max}}{R_1},$$

$$R_1 = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 + 2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot \cos(q_2)},$$

$$R_1 = \sqrt{1.07^2 + 0.65^2 + 2 \cdot 1.07 \cdot 0.65 \cdot \cos(70)} = 1.565 \text{ (м)};$$

Тоді:

$$\omega_2 = \frac{2}{1.565} = 1.278 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right);$$

Кутове прискорення:

$$\varepsilon_2 = \frac{V_{p.max}}{R_1 \cdot t_{роз}} = \frac{2}{1.565 \cdot 0.3} = 4.057 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right).$$

Отже момент:

$$M_{2max} = \frac{1}{\eta_1} \cdot (M_{2,1max} + M_{2ст})$$

Статичний момент:

$$\begin{aligned} M_{ст} = & m_1 \cdot 9.807 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(q_1) + m_{пнс} \cdot L_1 \cdot \sin(q_1) + m_2 \cdot 9.807 \cdot \\ & \cdot \left(L_1 \cdot \sin(q_1) + \frac{L_2}{2} \cdot \sin(q_1 + q_2) \right) \\ & + ((m_0 + m_c) \cdot 9.807 \cdot L_1 \cdot \sin(q_1) + L_2 \cdot \sin(q_1 + q_2)) \end{aligned}$$

;

$$q_1 = \arccos \left(\frac{L_2 \cdot \sin(180 - q_2)}{\sqrt{L_1^2 + L_2^2 + 2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot \cos(q_2)}} \right) =$$

$$= \arccos \left(\frac{0.65 \cdot \sin(180 - 70)}{\sqrt{1.07^2 + 0.65^2 + 2 \cdot 1.07 \cdot 0.65 \cdot \cos(70)}} \right) = 67.023^\circ;$$

Тоді:

$$M_{2cr} = m_1 \cdot 9.807 \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \sin(q_1) + m_{np2} \cdot L_1 \cdot \sin(q_1) + m_2 \cdot 9.807 \cdot$$

$$\cdot \left(L_1 \cdot \sin(q_1) + \frac{L_2}{2} \cdot \sin(q_1 + q_2) \right)$$

$$+ ((m_b + m_c) \cdot 9.807 \cdot L_1 \cdot \sin(q_1) + L_2 \cdot \sin(q_1 + q_2)) = 3302 \text{ (Н} \cdot \text{м)};$$

Динамічний момент:

$$J_{2скв} = (m_b + m_c) \cdot R_1^2 + m_2 \cdot \rho^2 + m_{np2} \cdot L_1^2;$$

$$\rho = \sqrt{L_1^2 + \frac{L_2^2}{4} + 2 \cdot L_1 \cdot \frac{L_2}{2} \cdot \cos(q_2)} = \sqrt{1.07^2 + \frac{0.65^2}{4} + 2 \cdot 1.07 \cdot \frac{0.65}{2} \cdot \cos(70)} = 1.22 \text{ (м)};$$

Тоді:

$$J_{2скв} = (60 + 80) \cdot 1.565^2 + 70 \cdot 1.22^2 + 119.5 \cdot 1.07^2 = 606.67 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)};$$

Тоді:

$$M_{2дин} = J_{2скв} \cdot \varepsilon_1 = 606.67 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)} \cdot 4.057 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right) = 2585 \text{ (Н} \cdot \text{м)};$$

Момент:

$$M_{2\max} = \frac{1}{\eta_1} \cdot (M_{2\text{лин}} + M_{2\text{ст}}) = \frac{1}{0,85} \cdot (2585 \text{ (Н} \cdot \text{м)} + 3302 \text{ (Н} \cdot \text{м)}) \\ = 6925 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Потужність:

$$P_{2\max} = M_{2\max} \cdot \omega_2 = 6925 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \cdot 1,278 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right) = 8851 \text{ (Вт)}.$$

Таблиця 1.2. Параметри промислового робота

Найбільший кут повороту схопу навколо подовжньої осі руки, град	180		-
Межі кутового розташування руки відносно подовжньої осі маніпулятора, град	+30...50	-10...+30	-
Кутова швидкість повороту руки, град/с	60	81	-
Швидкість підйому руки, м/с	0,08	0,125	0,25
Швидкість висунення руки, м/с	0,4	0,6	0,55
Точність позиціонування, мм: за поворотом руки на радіусі 1400 мм за іншими координатами	±0,25 ±0,1		- ±0,1
Тиск повітря у мережі, мПа	0,5...0,6	0,4...0,9	0,45...1,0
Максимальна витрата повітря, м ³ /год	120	132	-
Споживча потужність, кВт	0,9	1,0	0,7
Габаритні розміри маніпулятора, мм	1390x840x970	1390x1040x970	800x500x810
Габаритні розміри системи керування, мм	535x650x845	550x490x1200	450x560x920
Маса, кг: маніпулятора	560	560	326
пульта управління	80	100	70

Перевіримо двигун:

$$\omega_{\max} = \frac{V_{p,\max}}{L_2} = \frac{0.5}{0.25} = 2 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right);$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{a_{p,\max}}{L_2} = \frac{0.2}{0.25} = 0.8 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right);$$

$$\begin{aligned} M_{\text{вст}} &= 9.807 \cdot \left((m_0 + m_c) \cdot L_2 + m_2 \cdot \frac{L_2}{2} \right) = \\ &= 9.807 \cdot \left((60 + 70) \cdot 0.25 + 50 \cdot \frac{0.25}{2} \right) = 380.021 \text{ (Н} \cdot \text{м)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{\text{вкв}} &= \left((m_0 + m_c) \cdot L_2^2 + m_2 \cdot \frac{L_2^2}{4} \right) = \left((60 + 70) \cdot 0.25^2 + 50 \cdot \frac{0.25^2}{4} \right) = \\ &= 8.906 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2); \end{aligned}$$

Тоді момент:

$$M_{\text{вдмакс}} = J_{\text{вкв}} \cdot \varepsilon_{\max} = 8.906 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) \cdot 0.8 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right) = 7.125 \text{ (Н} \cdot \text{м)};$$

Отже:

$$\begin{aligned} M_{\text{вмакс}} &= \frac{1}{\eta_2} \cdot (M_{\text{вдмакс}} + M_{\text{вст}}) = \frac{1}{0.85} \cdot (7.125 \text{ (Н} \cdot \text{м)} + 380.021 \text{ (Н} \cdot \text{м)}) = \\ &= 455.466 \text{ (Н} \cdot \text{м)}; \end{aligned}$$

Потужність:

$$P_{\text{бмакс}} = M_{\text{бмакс}} \cdot \omega_{\text{макс}} = 455.466 \text{ (Н} \cdot \text{м)} \cdot 3 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right) = 1366.399 \text{ (Вт)};$$

Обираємо серводвигуни:

Вісь	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Двигун	MCS 09F38	MCS 09H60	MCS 09D60	MCS 09D41	MCS 06F41	MCS 06C41
n_N , об/хв	3750	6000	6000	4050	4050	4050
n_{max} об/хв	7000	7000	7000	7000	8000	8000
M_0 , Нм	4,2	5,5	3,3	3,3	1,5	0,8
M_n , Нм	3,1	3,0	1,8	2,3	1,2	0,6
M_{max} Нм	15,0	20,0	9,5	9,5	4,4	2,4
P_n , кВт	1,2	1,9	1,1	1,0	0,51	0,25
I_n , А	2,5	6,0	3,8	2,3	1,5	1,3
f_n , Гц	250	400	400	270	270	270
J^{mot} , кг \cdot м ² \cdot 10 ⁻⁴	1,5	1,9	1,1	1,1	0,22	0,14
ККД, %	96	96	96	96	96	96
m , кг	5,2	6,1	4,3	4,3	2,2	1,8

1.4. Розрахунок елементів керування електромеханічною системою промислового робота

Вибір перетворювача для синхронного електричного двигуна відрізняється від вибору такого перетворювача для керування асинхронними електричним двигуном.

Але така відмінність стосується тільки системи керування перетворювачем.

Вибір параметрів силових елементів залежатиме від характеристик електроприводу як синхронного так й асинхронного електричного двигуна.

Таблиця 1.3. Параметри елементів керування

Вісь Двигун	A1 ECS_A008	A2 ECS_A016	A3 ECS_A008	A4 ECS_A004	A5 ECS_A004	A6 ECS_A004
Струм прискорення, А	8,0	16,0	8,0	4,0	4,0	4,0
Ном. струм, А	4,0	8,0	4,0	2,0	2,0	2,0
Струм утримання, А	4,0	8,0	4,0	2,0	2,0	2,0
Потужність, кВт	2,2	5,5	2,2	1,1	1,1	1,1
Струм шини, А	4,9	9,8	4,9	2,5	2,5	2,5
Ємність, мкФ	165	165	165	165	165	165
Напруга, В	0 ? 770	0 ? 770	0 ? 770	0 ? 770	0 ? 770	0 ? 770
Макс. частота, Гц	600	600	600	600	600	600

1.5. Розрахунок електромеханічної системи промислового робота

Розрахуємо складові принципової схеми заміщення синхронного електричного приводу та параметри системи керування ним.

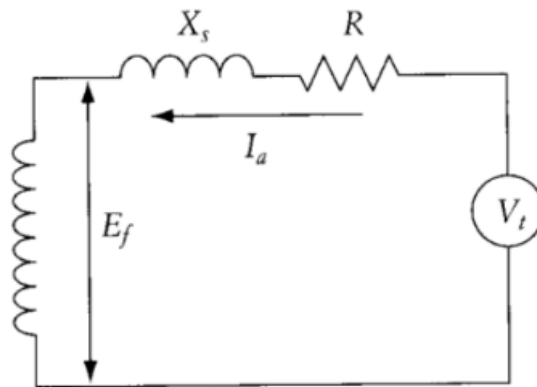


Рис.1.11. Схема заміщення електромеханічної системи промислового робота

Отже:

$$k_{\text{тп}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}},$$

$$k_{\text{тп}} = \frac{400 \cdot \sqrt{2}}{10 \text{ В}} = 56.569;$$

$$X_{Lc} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_c = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2.14 \cdot 10^{-3} = 0.672 \text{ (Ом)};$$

Отже:

$$Z_c = \sqrt{R_c^2 + L_c^2} = \sqrt{0.273^2 + 0.672^2} = 0.726 \text{ (Ом)}.$$

Знайдемо:

$$J = J_{дв} + J_{ред} = 9.5 \cdot 10^{-3} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) + 0.405 \cdot 10^{-1} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) = 9.54 \cdot 10^{-3} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2)$$

Розрахуємо :

$$M_{II} = \frac{P_{II} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_n} = 47.746 \text{ (II} \cdot \text{м)}$$

$$M_{мотор} = M_{II} \cdot \lambda_M = 47.746 \text{ (II} \cdot \text{м)} \cdot 2 = 95.493 \text{ (II} \cdot \text{м)}$$

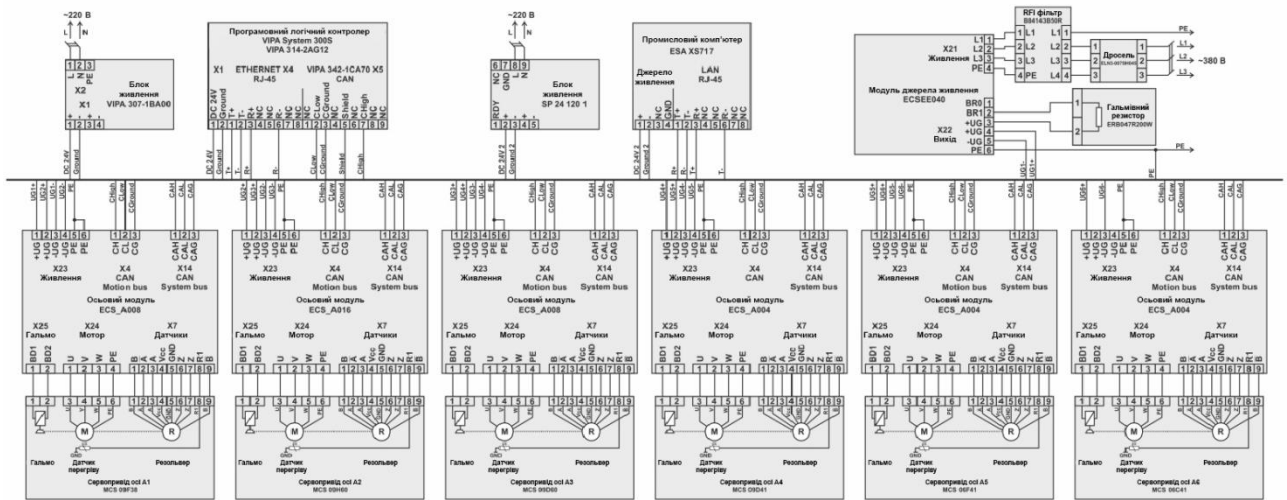


Рис.1.12. Схема системи керування

Отже:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

Або:

$$\eta = f(M)$$

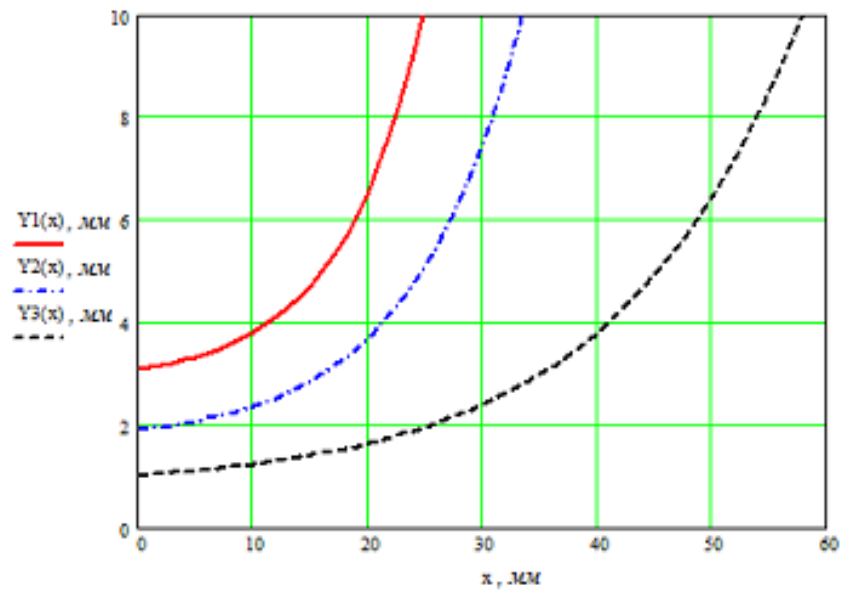


Рис.1.13. Характеристики електромеханічної системи промислового робота

Запишемо:

$$M = f(\theta);$$

Або:

$$M = M_{\text{макс}} \sin \theta;$$

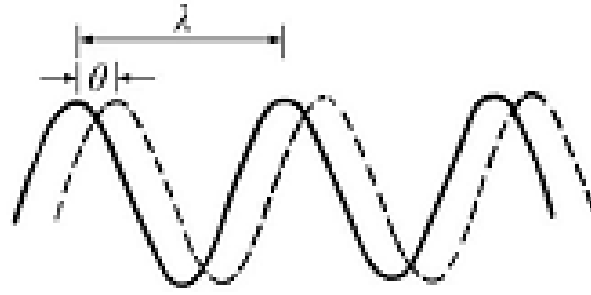


Рис.1.14. Кутові характеристики електромеханічної системи промислового робота

Розрахуємо:

$$\eta = \frac{M_c \cdot \omega}{M_c \cdot \omega + \Delta P_{\Sigma}}$$

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{зм}}$$

Потужність:

$$\Delta P_{\text{пост}} = k_{\text{мех}} \cdot P_n \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 = 0.005 \cdot 7.5 (\text{кВт}) \cdot \left(\frac{314.159}{157.08} \right)^2 = 150 (\text{Вт}),$$

Або:

$$\Delta P_{\text{зм}} = I_{\text{дв}}^2 \cdot R_e = 20^2 \cdot 0.273 = 109.2 (\text{Вт}).$$

$$\Delta P_{\Sigma} = 150 (\text{Вт}) + 109.2 (\text{Вт}) = 259.2 (\text{Вт})$$

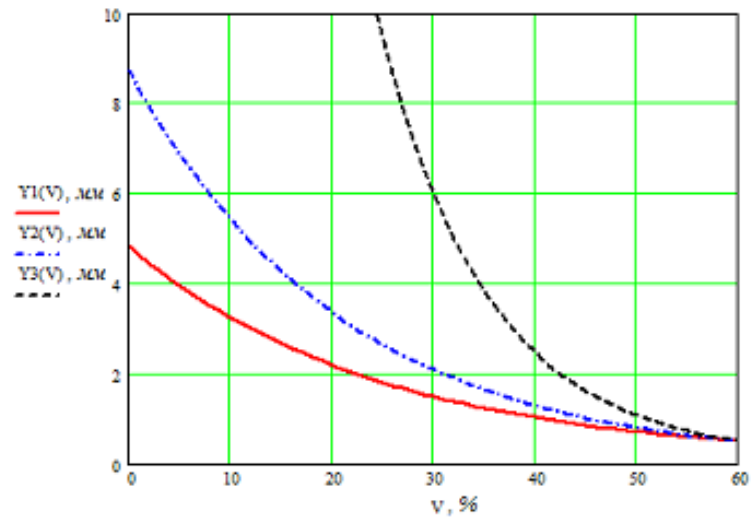


Рис.1.15. Залежність ККД електромеханічної системи промислового робота

Розрахуємо:

$$\cos \varphi = \frac{\frac{M_c \cdot \omega}{\eta}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n}$$

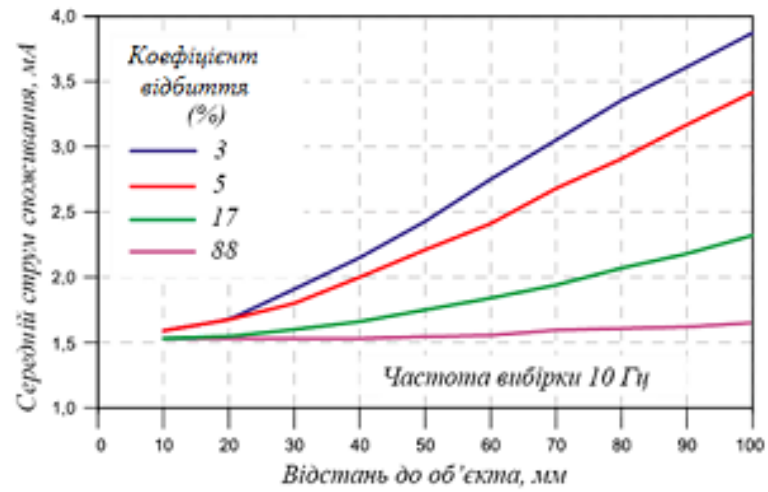


Рис.1.16. Залежність коефіцієнту відбиття електромеханічної системи промислового робота

РОЗДІЛ 2

Розробка автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота з використанням синхронних серводвигунів

2.1. Структура системи керування електромеханічною системою промислового робота

Для системи керування електроприводом елементарних ланок промислового маніпулятора важливим є забезпечення точності відтворення траєкторії руху.

Для цього у якості завдання щодо системи керування головною задачею є координація та узгодження траєкторії руху кожного з елементів ступеню свободи руху маніпулятора.

При відпрацюванні подібних завдань у просторі системи керування покладаються на забезпечення точності виконання операцій.

Такі структури складних систем керування мають містити певні регулюючі ланки для забезпечення заданої точності відпрацювання кожного з контрольованих параметрів.

З огляду виконання структури системи керування можна навести підлегле або слідкуючи регулювання параметрів електроприводу.

У якості представлення задачі та розв'язку завдань регулювання можна розглянути скалярне та векторне керування.

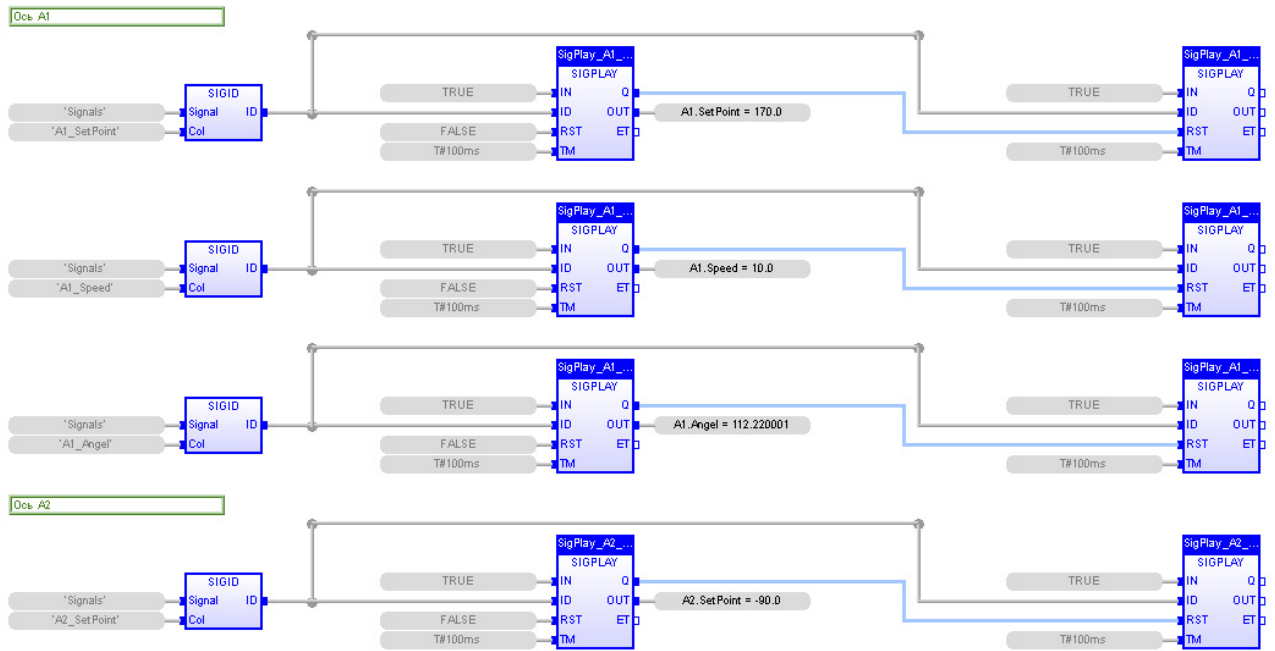


Рис. 2.1. Структура системи керування електромеханічною системою промислового робота

2.2. Розрахунок системи керування електромеханічною системою промислового робота

Для точності виконання операцій щодо регулювання параметрів електроприводу промислового маніпулятора слід виконати розрахунок та налагодження системи керування.

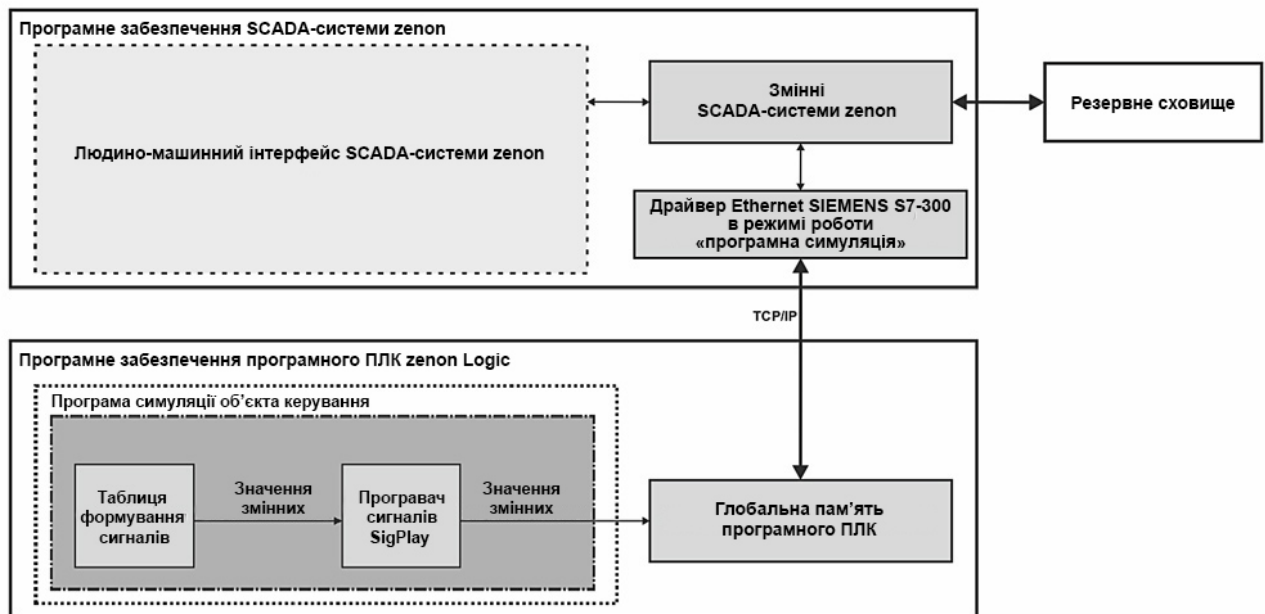


Рис.2.2. Система керування електромеханічною системою промислового робота

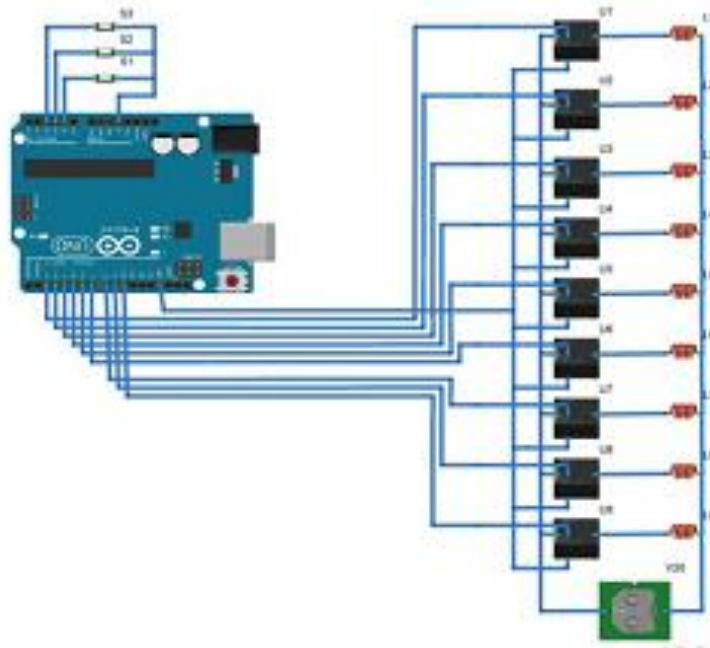


Рис.2.3. Структурна системи керування струмом електромеханічної системи промислового робота

Розрахуємо:

$$U_{к.д} = -\frac{1}{k_u} \cdot \omega \cdot L_q \cdot i_a$$

Розрахуємо:

$$W_{ПЧ} = \frac{k_n}{T_n \cdot p + 1};$$

$$k_u = \frac{U_d}{U_k};$$

$$k_u = \frac{U_d}{U_k} = \frac{100 \text{ В} \cdot \sqrt{2}}{10 \text{ В}} = 56.569;$$

$$r_c = \frac{1}{f_{cp}},$$

$$f_{cp} = \frac{\omega_{min} + f_M}{2} = \frac{8 + 50 \text{ (Гц)}}{2} = 29 \text{ (Гц)};$$

$$T_{п} = r_c = \frac{1}{29 \text{ (Гц)}} = 0.034 \text{ (с)};$$

Тоді:

$$W_{пч} = \frac{56.569}{0.034 \cdot p + 1};$$

Знайдемо:

$$T_d = \frac{L_s}{R_s} = \frac{2.14 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}}{0.273 \text{ (Ом)}} = 0.008 \text{ (с)};$$

Передатна функція:

$$W_{pc}(p) = \frac{R_s \cdot (T_d \cdot p + 1)}{2 \cdot k_{п} \cdot k_{лс} \cdot T_{п}} = \frac{I_s}{2 \cdot k_{п} \cdot k_{лс} \cdot T_{п}} + \frac{R_s}{2 \cdot k_{п} \cdot k_{лс} \cdot T_{п}} \cdot \frac{1}{p}$$

$$k_{лс} = \frac{U_A}{I_{max}},$$

$$I_{max} = 50 \text{ (А)};$$

$$k_{лс} = \frac{10 \text{ (В)}}{50 \text{ (А)}} = 0.2.$$

Тоді:

$$\begin{aligned}
 W_{pc}(p) &= \frac{2.14 \cdot 10^{-3} (\text{Гн})}{2 \cdot 56.569 \cdot 0.2 \cdot 0.034 (\text{с})} + \frac{0.273 (\text{Ом})}{2 \cdot 56.569 \cdot 0.2 \cdot 0.034 (\text{с})} \cdot \frac{1}{p} = \\
 &= 2.782 \cdot 10^{-3} + \frac{0.355}{p}
 \end{aligned}$$

Передатна функція:

$$W_{кг}(p) = \frac{\frac{1}{k_{дс}}}{2 \cdot T_{п}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{п} \cdot p + 1} = \frac{5}{2.378 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 0.069 \cdot p + 1}$$

Отже:

$$\begin{aligned}
 T_d &= \frac{L_s}{R_s} = \frac{2.14 \cdot 10^{-3} (\text{Гн})}{0.273 (\text{Ом})} = 0.008 (\text{с}); \\
 W_{pc}(p) &= \frac{R_s \cdot (T_d \cdot p + 1)}{2 \cdot k_{п} \cdot k_{дс} \cdot T_{п}} = \frac{L_s}{2 \cdot k_{п} \cdot k_{дс} \cdot T_{п}} + \frac{R_s}{2 \cdot k_{п} \cdot k_{дс} \cdot T_{п}} \cdot \frac{1}{p} = \\
 &= \frac{2.14 \cdot 10^{-3} (\text{Гн})}{2 \cdot 56.569 \cdot 0.2 \cdot 0.034 (\text{с})} + \frac{0.273 (\text{Ом})}{2 \cdot 56.569 \cdot 0.2 \cdot 0.034 (\text{с})} \cdot \frac{1}{p} = \\
 &= 2.782 \cdot 10^{-3} + \frac{0.355}{p}.
 \end{aligned}$$

Тоді:

$$U_{ка} = \omega(L_d \cdot i_d + \Phi_0).$$

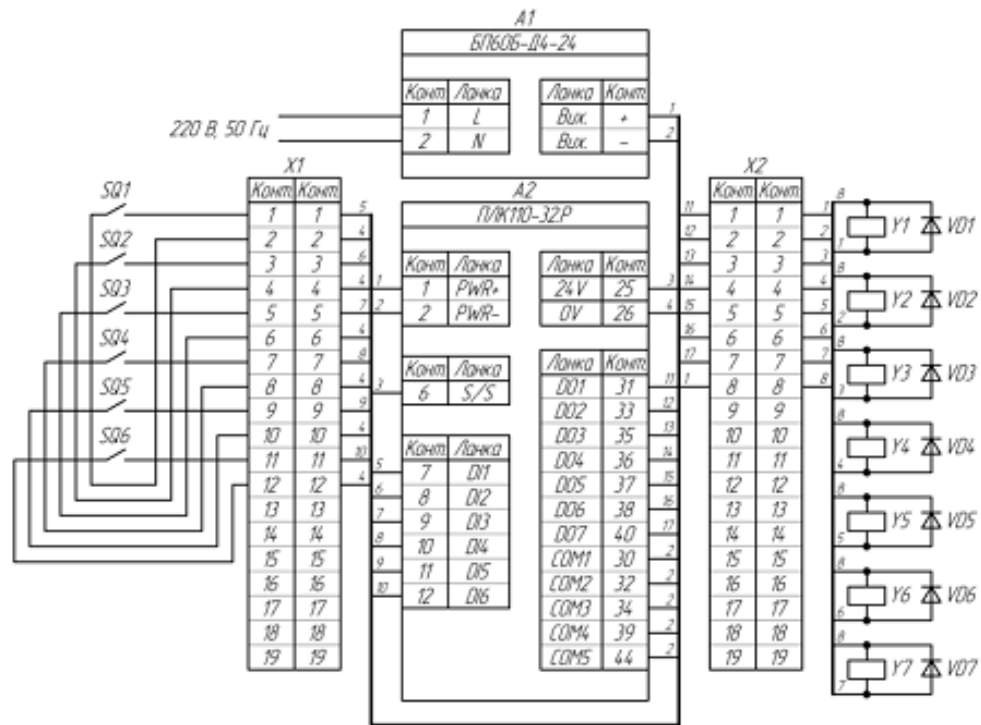


Рис.2.4. Структура контуру швидкості електромеханічної системи промислового робота

Отже:

$$W_{\text{рш}}(p) = \frac{k_{\text{дс}} \cdot J}{3 \cdot T_{\text{св}} \cdot \Phi_0 \cdot z_p \cdot k_{\text{дш}}} + \frac{k_{\text{дс}} \cdot J}{12 \cdot T_{\text{св}}^2 \cdot \Phi_0 \cdot z_p \cdot k_{\text{дш}}} \cdot \frac{1}{p};$$

$$J = J_{\text{ш}} + J_{\text{ред}} = 9.5 \cdot 10^{-3} (\text{кг} \cdot \text{м}^2) + 0.405 \cdot 10^{-4} (\text{кг} \cdot \text{м}^2) = 9.54 \cdot 10^{-3} (\text{кг} \cdot \text{м}^2);$$

$$k_{\text{дш}} = \frac{U_A}{\omega_{\text{нрт}}} = \frac{10 (\text{В}) \cdot 30}{\pi \cdot n_{\text{нрт}}} = \frac{10 (\text{В}) \cdot 30}{\pi \cdot 1500 \left(\frac{\text{Об}}{\text{хв}} \right)} = 0.064 \left(\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}} \right);$$

$$z_p = \frac{60 \cdot f_{\text{н}}}{n_{\text{нрт}}} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2.$$

$$\Phi_0 = B \cdot S,$$

Отже:

$$S = \pi \cdot r^2,$$

$$S = \pi \cdot 0.116^2 = 0.042 \text{ (м}^2\text{)}$$

Тоді:

$$\Phi_0 = 1.3 \text{ (Тл)} \cdot 0.042 \text{ (м}^2\text{)} = 0.059 \text{ (Вб)} = 59 \text{ (мВб)}.$$

Тоді:

$$W_{\text{пр}}(p) = \frac{k_{\text{дс}} \cdot J}{3 \cdot T_{\text{кк}} \cdot \Phi_0 \cdot z_p \cdot k_{\text{дм}}} + \frac{k_{\text{дс}} \cdot J}{12 \cdot T_{\text{кк}}^2 \cdot \Phi_0 \cdot z_p \cdot k_{\text{дм}}} \cdot \frac{1}{p};$$

$$\zeta_{\text{пр}}(p) = \frac{0.2 \cdot 9.54 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 0.068 \text{ (с)} \cdot 0.059 \text{ (Вб)} \cdot 2 \cdot 0.064 \left(\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}\right)} + \frac{0.2 \cdot 9.54 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0.068^2 \text{ (с)} \cdot 0.059 \text{ (Вб)} \cdot 2 \cdot 0.064 \left(\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}\right)} \cdot \frac{1}{p} = 0.084 + \frac{4.563}{p};$$

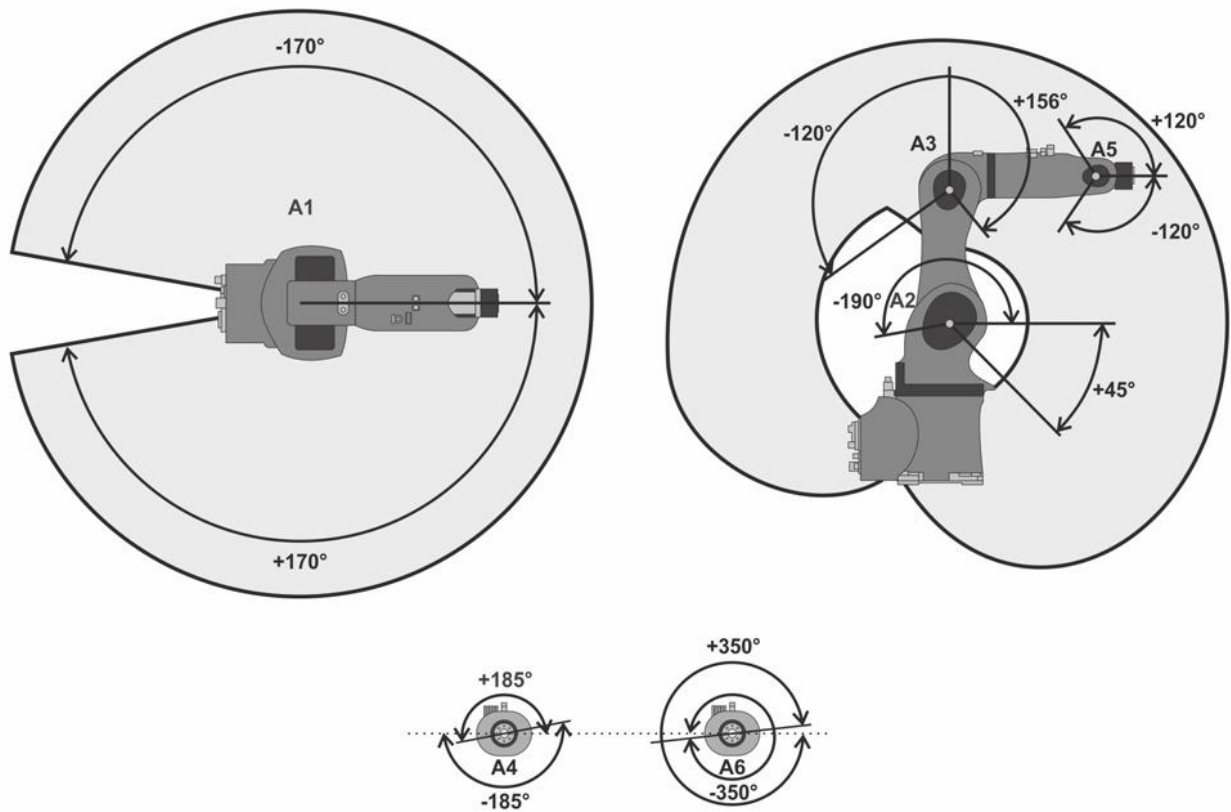


Рис.2.5. Структура контуру положення електромеханічної системи промислового робота

Для положення:

$$T_{\text{шп}} = T_c + \sum T_{\text{шп}}$$

Розрахуємо:

$$W_{\text{шп}} = K_{\text{шп}}$$

$$K_{PII} = \frac{2 \cdot K_c}{K_{II}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{max}}{\varphi_{зад, макс}}}$$

$$K_{II} = \frac{U_{\Delta}}{\varphi_{макс}} = \frac{10(\text{В})}{75 \left(\frac{\text{мм}}{\text{об}} \right)} = 0.133;$$

$$K_c = \frac{U_{зш}}{\omega_{уст}}$$

$$K_c = \frac{U_{зш}}{\omega_{уст}} = \frac{10(\text{В})}{157.08 \left(\frac{\text{рад/с}}{\text{с}} \right)} = 0.064 \left(\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}} \right)$$

Тоді K_{PII} :

$$K_{PII} = \frac{2 \cdot K_c}{K_{II}} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{max}}{\varphi_{зад, макс}}} = \frac{2 \cdot 0.064}{0.133} \cdot \sqrt{\frac{15.385}{75}}$$

Передатна функція:

$$W_{II}(p) = \frac{\frac{1}{K_{II}}}{2 \cdot T_{\mu II}^2 \cdot p^2 + 2 \cdot T_{\mu II} \cdot p + 1} = \frac{7.519}{0.104 \cdot p^2 + 2 \cdot 0.156 \cdot p + 1}$$

2.3. Автоматизована система керування електромеханічною системою промислового робота

Процес відтворення завдання руху промислового маніпулятора є складною технологічною задачею.

Для забезпечення ефективного керування такими складними системами слід виконувати погодження роботи їх складових.

Автоматизація подібного процесу спрощує завдання вибору параметрів системи регулювання кожного зі складових об'єкту керування.

Траєкторія для кожного з об'єктів регулювання розраховується відповідно до програми керування та надається у вигляді траєкторії завдання конкретної ланки.



Рис. 2.6. Траєкторія руху електромеханічної системи промислового робота

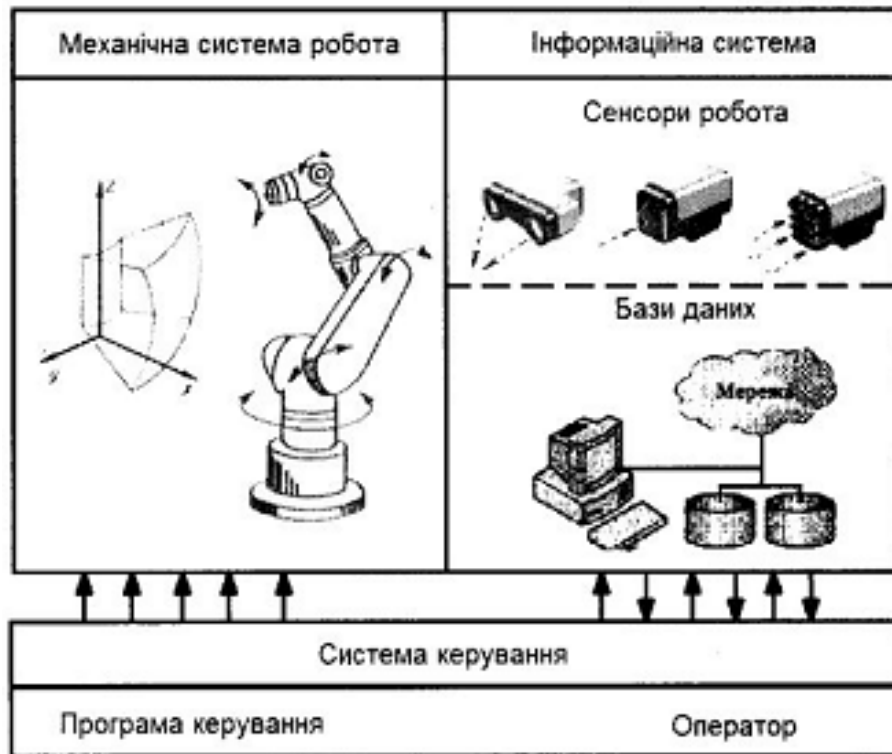


Рис. 2.9. Схема руху електромеханічної системи промислового робота

2.4. Вибір елементів автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота

Автоматизацію процесу керування промисловим маніпулятором можна виконати завдяки впровадженню у структуру системи керування мікропроцесорної техніки.

Мікропроцесорна техніка виконує операції розрахунку координат траєкторії руху промислового маніпулятора та забезпечує обчислення сигналів зворотного зв'язку.

Погодження сигналів завдання та координація траєкторій руху кожного з об'єктів регулювання виконується за допомогою шин даних та елементів зв'язку.

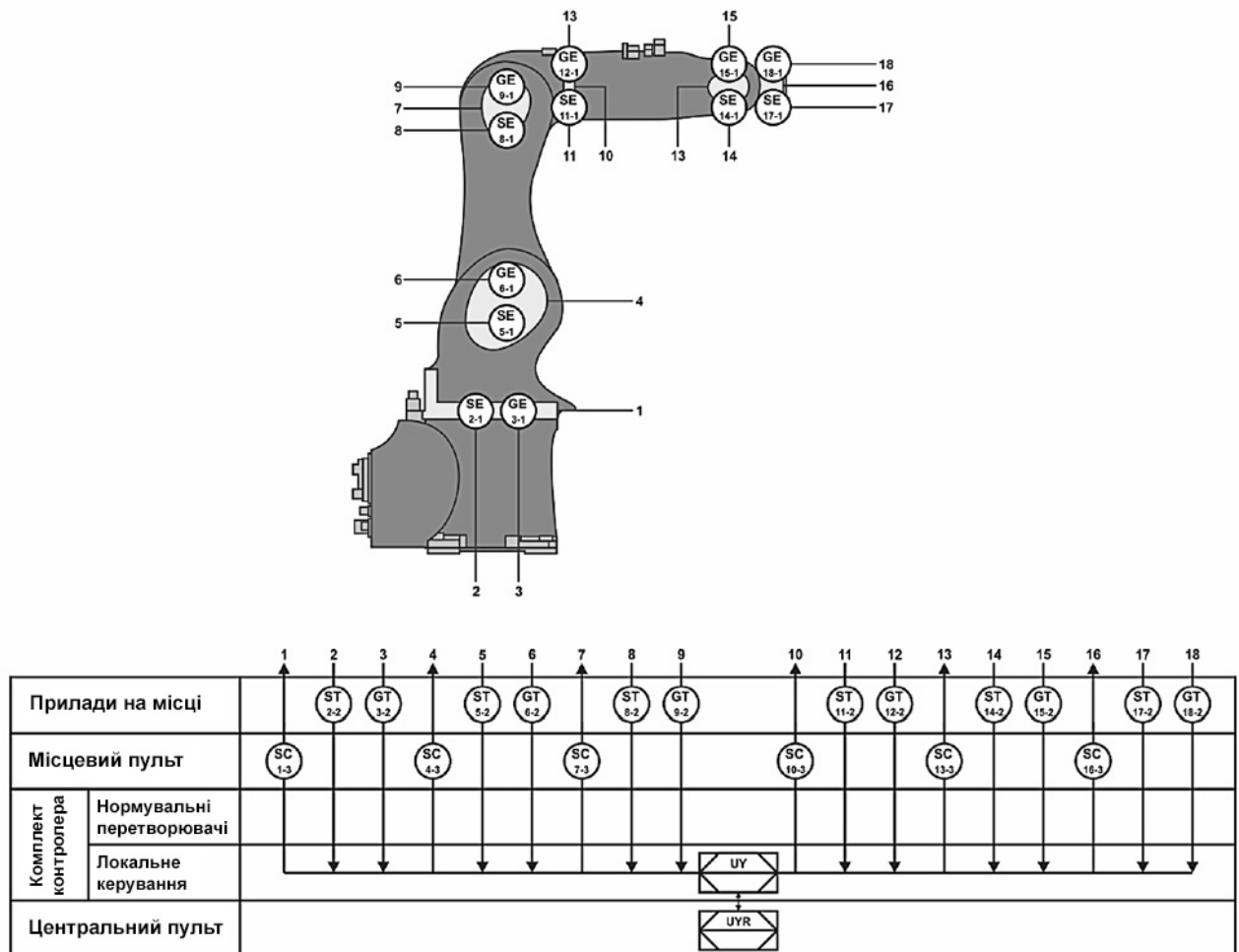


Рис. 2.10. Схема керування електромеханічною системою промислового робота



Рис.2.11. ПЛК контролер системи керування електромеханічною системою промислового робота

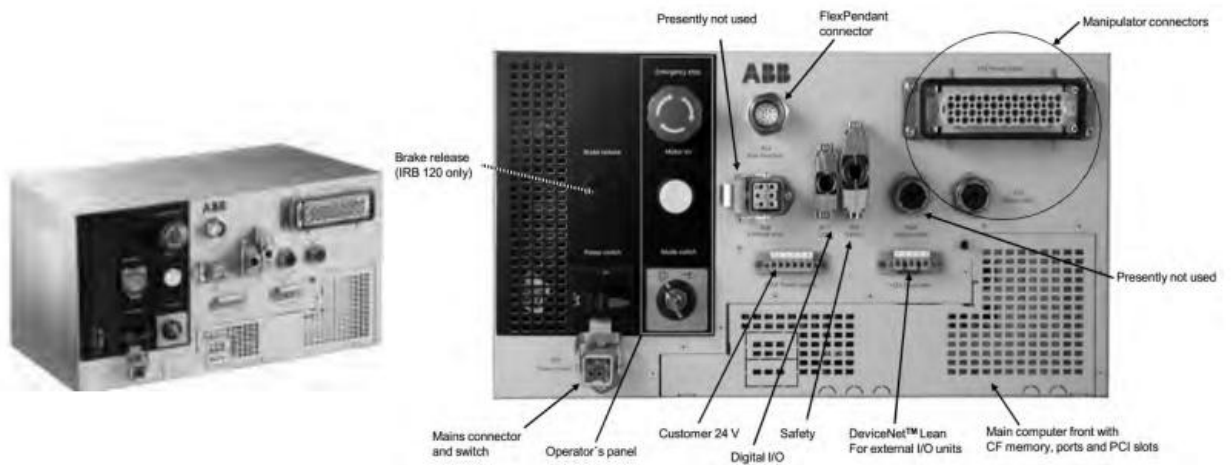


Рис.2.12. Модуль системи керування електромеханічною системою промислового робота

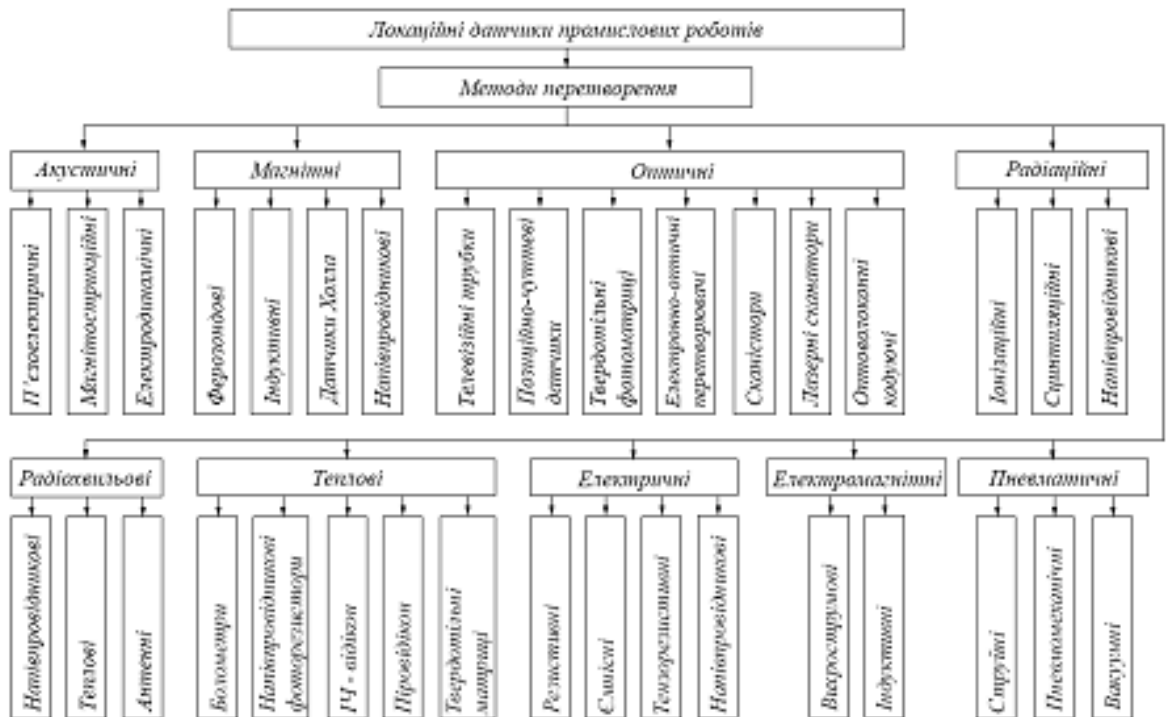


Рис.2.13. Структура програми системи керування електромеханічною системою промислового робота

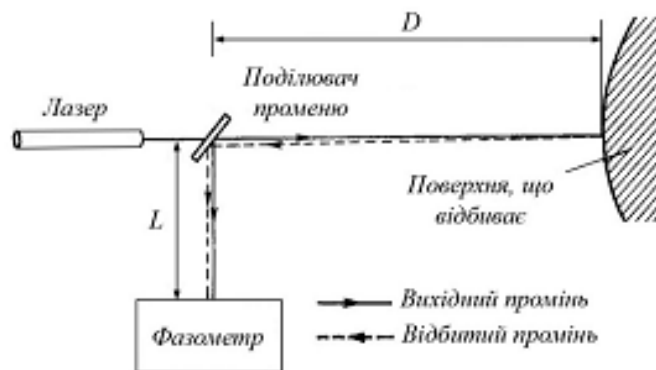


Рис.2.14. Принцип дії датчиків системи керування електромеханічною системою промислового робота

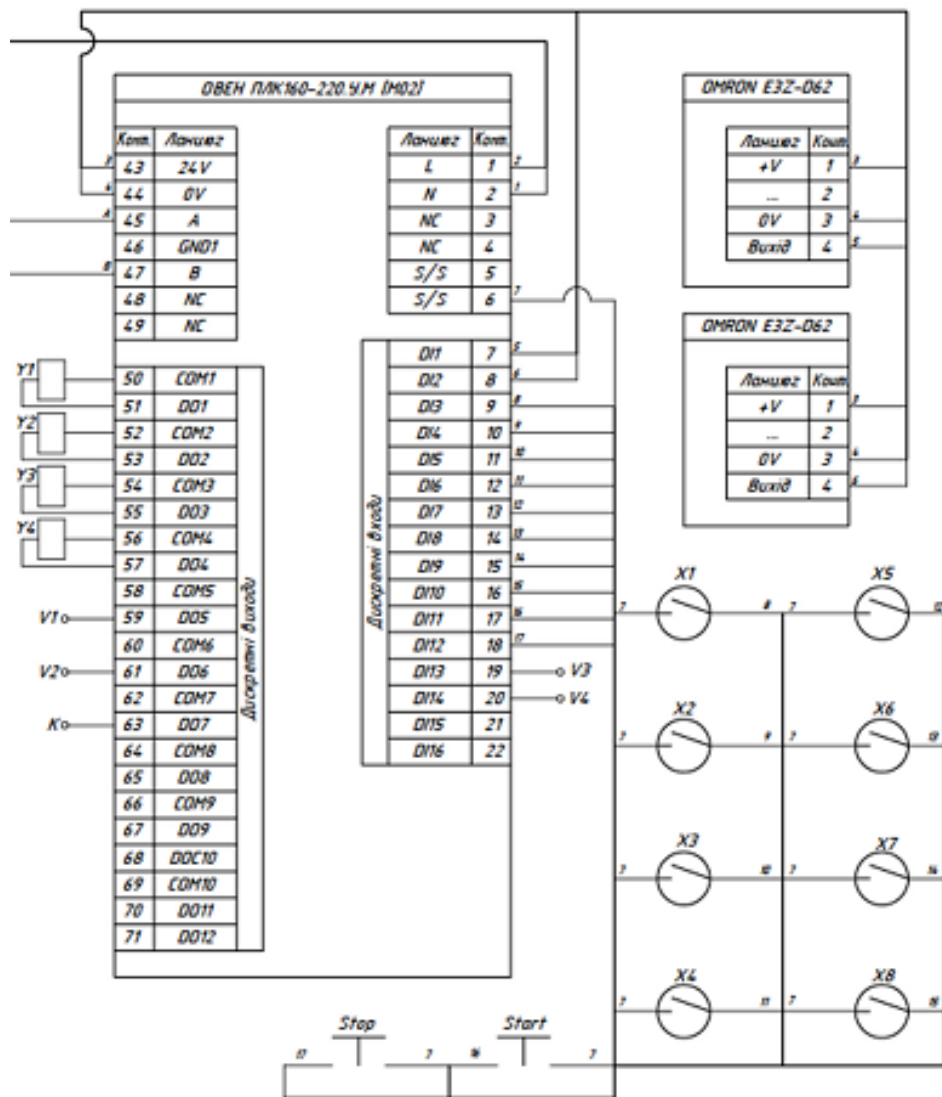


Рис.2.15. Принципова схема системи керування електромеханічною системою промислового робота

РОЗДІЛ 3

Дослідження автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота з використанням синхронних серводвигунів

3.1 Дослідження системи керування електромеханічною системою промислового робота

Для системи електроприводу промисловим маніпулятором з синхронними двигуном важливим є дослідження режимів його роботи.

За допомогою математичних програм можна виконувати таке дослідження на прикладі розробленої моделі.

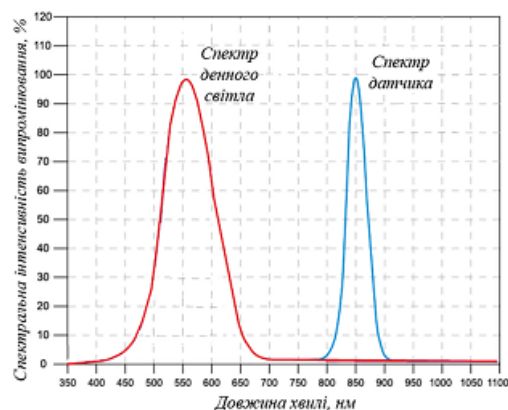


Рис.3.1. Спектр характеристик системи керування електромеханічною системою промислового робота

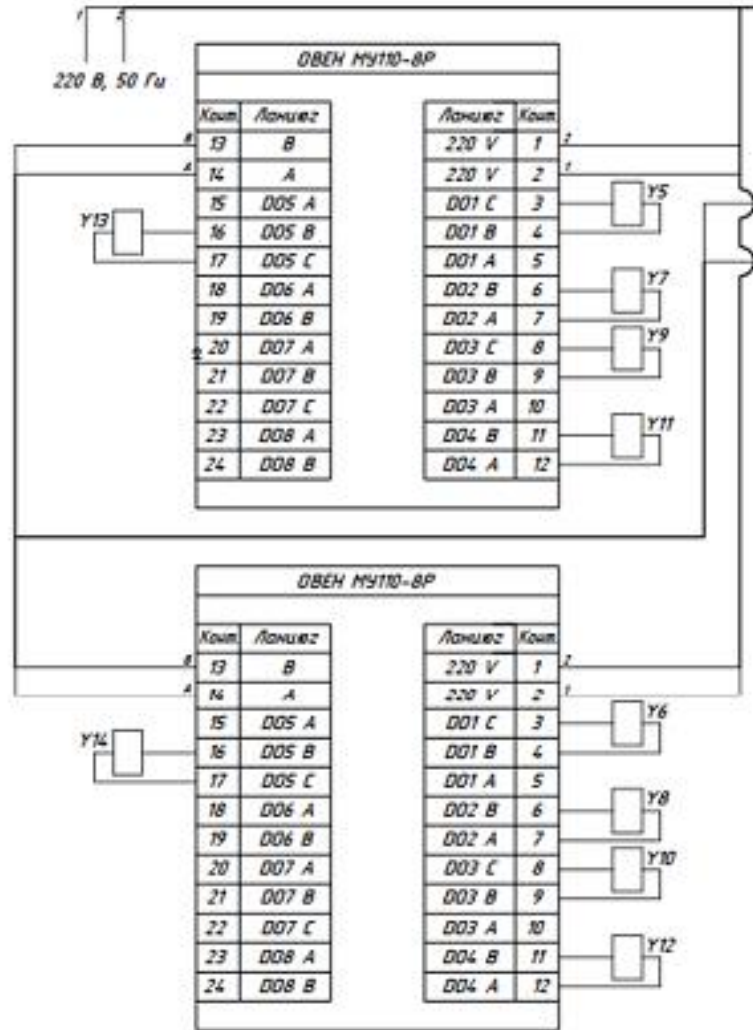


Рис.3.2. Структурна схема моделі системи керування електромеханічною системою промислового робота

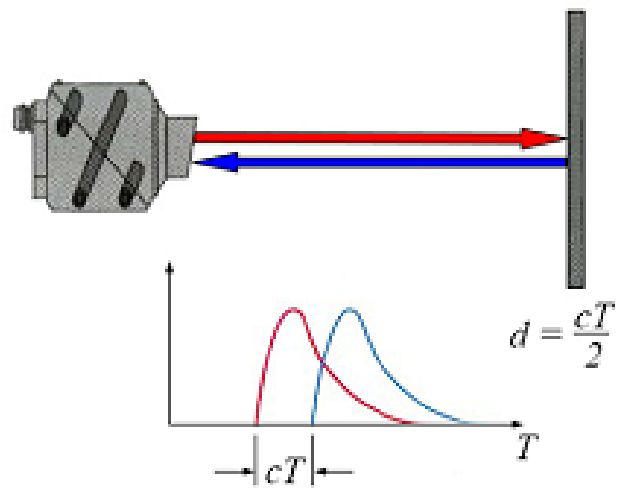


Рис.3.3. Статичні характеристики системи керування електромеханічною системою промислового робота

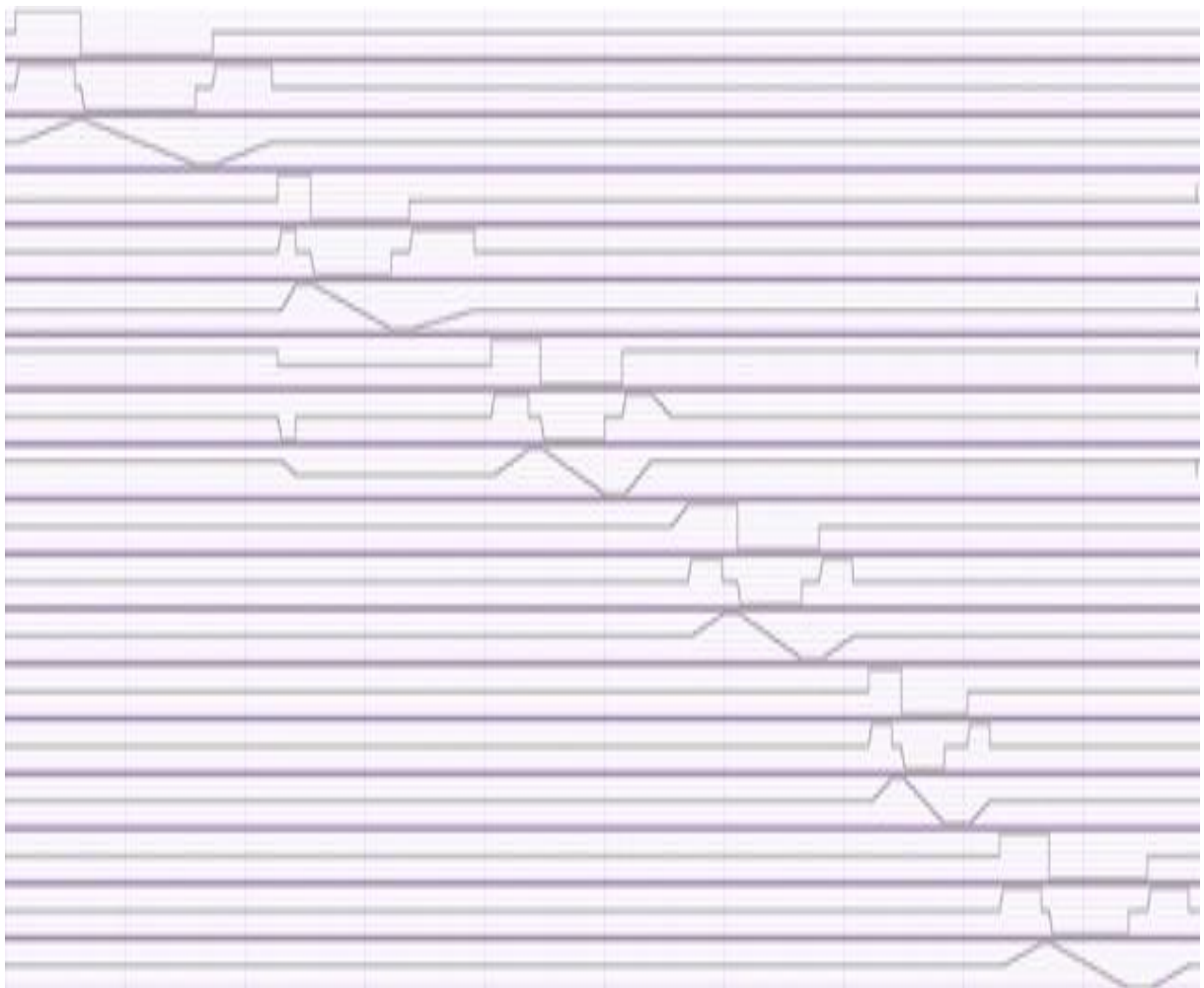


Рис.3.4. Динамічні характеристика системи керування електромеханічною системою промислового робота

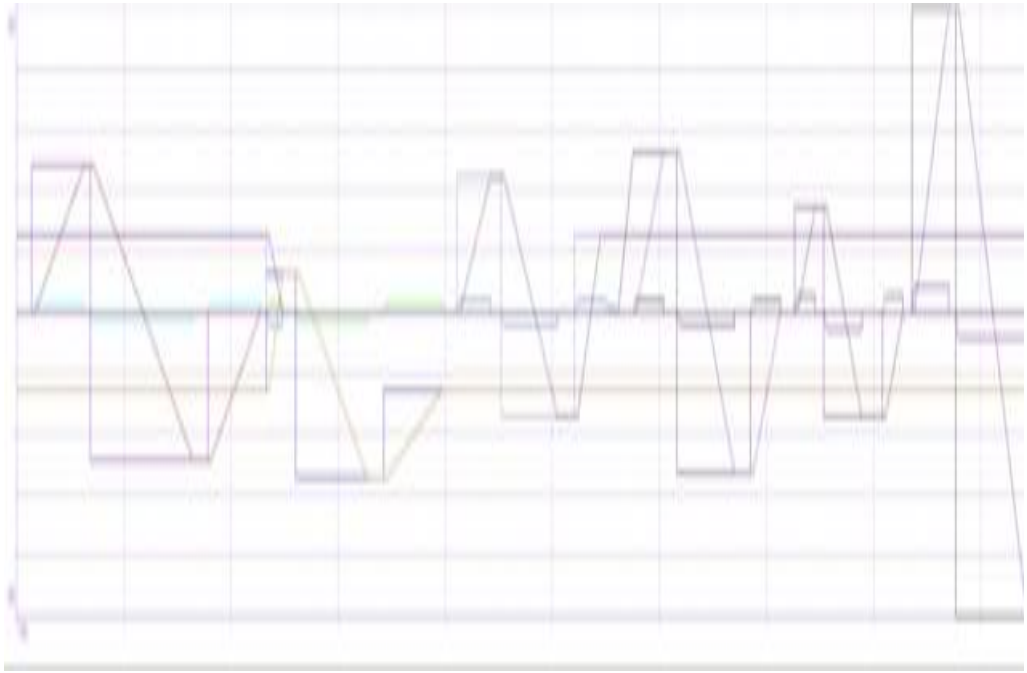


Рис.3.5. Динамічна характеристика системи керування електромеханічною системою промислового робота у контурі положення

3.2 Аналіз ефективності системи керування електромеханічною системою промислового робота

Правильність розрахунку та налаштування системи керування електроприводом промислового маніпулятора має підтверджуватись точністю виконання технологічних операцій протягом усіх режимів його роботи.

Завдяки цьому може бути підтверджена ефективність системи керування електроприводом промислового маніпулятора.

Висновки

У роботі досліджено систему керування електромеханічною системою промислового робота.

Також було розглянуто автоматизовану систему керування електромеханічною системою промислового робота з використанням синхронного електроприводу.

Проаналізовано можливості автоматизації системи керування електромеханічною системою промислового робота з використанням модернізації алгоритмів роботи. Було прийнято автоматизовану систему керування з використанням синхронних серводвигунів.

Також було проведено дослідження автоматизованої системи керування електромеханічною системою промислового робота на базі синхронного електроприводу й отримано графіки перехідних процесів, що підтверджують ефективність запропонованої системи керування.